

Criterios actuales para la gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas (*)

Por ANDRES SAHUQUILLO HERRAIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Catedrático de Geología Aplicada a las Obras Públicas.
Universidad Politécnica de Valencia

Se describen las posibilidades de las aguas subterráneas para ser utilizadas conjuntamente con las superficiales para satisfacer las diversas demandas de agua, analizando las características de los embalses subterráneos.

Después de pasar revista a las realizaciones más relevantes, se hace una descripción tipológica de las distintas posibilidades y se comentan los métodos y las tendencias actuales para analizar sistemas complejos en los que las aguas subterráneas juegan un papel importante.

1. INTRODUCCION

Como regla casi general, las aguas subterráneas se han utilizado para resolver problemas de abastecimiento urbano, agrícola o industrial de forma aislada. El desarrollo de los acuíferos se ha ido haciendo de forma progresiva, de acuerdo con las decisiones individuales de sus usuarios y mayoritariamente, debido a la iniciativa privada. El énfasis se suele situar en la localización de pozos con caudal elevado. Un paso importante ha sido el de la optimización de los caudales o de parámetros económicos relacionados con la gestión del agua de todo un acuífero.

Recientemente la tendencia ha sido la de considerar las aguas subterráneas como un componente más en un sistema de recursos hidráulicos. Parece evidente que si se incluyen las aguas subterráneas en un sistema de recursos hidráulicos, hay más oportunidades para conseguir mejores resultados al poder aprovechar las diferentes características de las aguas superficiales y de los acuíferos. Esto es lo que ha venido designándose como uso conjunto o utilización conjunta. Hasta ahora, la utilización conjunta ha sido muy reducida y está limitada a unos pocos países y a determinadas áreas geográficas. Sin embargo, las realizaciones existentes son lo suficientemente expresivas para que

sirvan como modelos a posibles soluciones análogas.

La metodología para el estudio y la gestión conjunta se ha desarrollado de forma muy rápida en los últimos años y la moda también ha llegado a España, donde se han desarrollado estudios con cierta profundidad y trabajos de investigación de bastante interés. (U.P.V.-S.G.O.P., 1983; Andréu, 1984; Andréu y Sahuquillo, 1984).

Parece claro que debe imponerse su aplicación sistemática en sistemas complejos y de una forma planificada, pues ello puede representar ventajas importantes, entre las que se pueden citar las siguientes:

- Mayor diversificación de las fuentes de suministro y consiguiente aumento de alternativas de gestión.
- Posibilidad de utilización del agua ya almacenada en el acuífero como recurso temporal para poder escalar inversiones costosas en el sistema superficial, lo cual, además, permite adaptarse a las variaciones de la demanda.
- Una mayor regulación de recursos, pues en años húmedos puede utilizarse más agua superficial y en años secos más agua subterránea.
- Posibilidad de utilización del acuífero como elemento de distribución, en toda el área en la que está presente.
- Mediante la recarga artificial puede utili-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1985.

zarse el acuífero como elemento de almacenamiento, reduciendo o modificando, además, el coste del bombeo.

- Puede utilizarse como elemento de filtración y de mezcla de aguas de distinta calidad.
- También pueden obtenerse ventajas cuando existen problemas de drenaje inducidos como consecuencia de la infiltración de excedentes de riego o por infiltración en canales no revestidos.

En segundo lugar, cualquier unidad hidrológica en la que existan embalses subterráneos, independientemente de que exista o no una utilización conjunta planificada, tendrá alguna relación con las aguas superficiales. Por tanto, es necesario evaluar la incidencia de la explotación del embalse subterráneo sobre las disponibilidades aguas abajo del mismo. Tenemos que afirmar (Fowler, 1981), que la utilización conjunta se impone como una necesidad evidente en zonas con problemas de suministro de agua. La gestión de las aguas subterráneas no puede existir sin la de las superficiales, y la gestión de las aguas superficiales no puede alcanzar su óptimo, si no se incluyen los embalses subterráneos.

Cuando por el aumento de la demanda se recurra a fuentes nuevas de agua, éstas se podrán integrar adecuadamente aplicando los criterios de la utilización conjunta. Igualmente, la utilización de forma separada de los recursos hidráulicos, tiene unos techos y unas posibilidades que pueden ampliarse si se utilizan de forma conjunta.

Hasta ahora los casos con realizaciones prácticas, casi siempre han sido ocasionados por la necesidad de dar solución a problemas graves de escasez de agua, pero sus ventajas no hay por qué aplicarlas exclusivamente a casos extremos. Puede recurrirse a la utilización conjunta en zonas con abundancia de agua, siempre que se puedan obtener mejores resultados técnicos o económicos. Tal es el caso de Santander que comentaremos después.

La evaluación de las alternativas más numerosas y complejas que se generan al considerar el uso conjunto, ha sido posible por el desarrollo, en los últimos años, de modelos de simulación y optimización.

2. EMBALSES SUPERFICIALES Y EMBALSES SUBTERRANEOS

Los embalses superficiales y los subterráneos son análogos en el sentido de que almacenan agua y tienen unos mecanismos de recarga y de descarga. Los embalses superficiales pueden almacenar agua, no existiendo limitación en los caudales de entrada y pueden proyectarse para descargar a un ritmo prácticamente ilimitado en relación con los caudales demandados. Por el contrario, el caudal de recarga de los embalses subterráneos normalmente es relativamente pequeño. En períodos en los que existen sobrantes de agua superficial los acuíferos pueden recargarse artificialmente. La recarga artificial puede hacerse de varias formas: infiltración en cauces colgados, acondicionados o no, filtraciones en canales no revestidos, balsas, zanjas, presas permeables, excedentes de riego, etc. Por el contrario, el almacenamiento de agua superficial en presas puede hacer disminuir la recarga de cauces perdedores situados aguas abajo.

La recarga artificial no sólo se ha utilizado con éxito para almacenar excedentes de agua superficial (California, Israel, Cataluña en España, etc.), sino que se ha empleado como procedimiento de distribución de los recursos hidráulicos a través del acuífero o para evitar la intrusión marina en acuíferos costeros, ya sea a través de barreras de inyección o para alimentar acuíferos sobreexplotados. No obstante, es un método caro y las realizaciones prácticas con los fines anteriores son relativamente limitadas. Solamente debe usarse en los casos en los que se hayan agotado otras posibilidades y donde el valor del agua sea alto. En las primeras etapas del uso conjunto parece más oportuno recurrir al bombeo alternativo de los acuíferos en los años más secos y proporcionar más agua superficial en los más húmedos. De esta forma se puede aumentar la regulación. El almacenamiento subterráneo se obtiene a través de las diferencias de agua almacenada al final de los períodos seco y húmedo.

La filtración de embalses a acuíferos conectados con él puede ser una desventaja, a menos que el acuífero se utilice conjuntamente con el embalse, y las filtraciones se utilicen como un método indirecto de recarga artificial. Es-

te es el caso de los embalses de Schar y María Cristina en la Plana de Castellón, (Aragón y Sahuquillo, 1975) y Pantior en Senegal, (Martín y Moussu, 1967) o la recarga producida por embalses en las calizas de Edwards en Texas, en los que se recargaban 20 Hm³/año, existiendo un proyecto para pasar a 265 Hm³. (Green, 1965).

El almacenamiento subterráneo presenta la ventaja de no tener pérdidas por evaporación, pérdidas que pueden ser muy importantes en zonas áridas o semiáridas. Por el contrario, tienen el inconveniente de que sus salidas sólo son controlables en parte. Las salidas del acuífero por drenaje a ríos, manantiales, otros acuíferos o al mar, depende del estado del acuífero en cada momento y no se puede modificar de modo inmediato (aunque sí a largo plazo) por los bombeos —o recargas— que se efectúen.

3. INFORMACION E INCERTIDUMBRE

Wiener (1972), ha puesto de manifiesto de forma brillante, los siguientes aspectos sobre la necesidad de información y las incertidumbres relacionadas con la toma de decisiones en el aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas.

- a) Los caudales de los ríos representan, en la mayor parte de los casos, una respuesta rápida a los fenómenos climáticos. La información que puede obtenerse de registros de datos de aguas subterráneas de pocos años de duración, es normalmente más confiable, si se analizan adecuadamente, que la que da una serie mucho más larga de aguas superficiales. La gran inercia de los acuíferos proporcionada por la gran cantidad de agua que tienen almacenada, integra un período largo de fenómenos hidrometeorológicos, y registros cortos pueden dar una información global mucho mayor.
- b) La variabilidad de los caudales superficiales es mucho mayor que la de los subterráneos. No pueden hacerse previsiones de caudales superficiales a medio y largo plazo. Su comportamiento es estocástico y sólo puede hacerse en términos de probabilidad. El comportamiento de las aguas

subterráneas es mucho más suave y determinista debido a la relación usualmente elevada entre el agua almacenada y la recarga media de un acuífero.

- c) La localización de los recursos superficiales es lineal; la de las aguas subterráneas, bidimensional. Por el contrario, los caudales que se aprovechan en los ríos son mucho mayores que los que se suelen obtener de un campo de pozos.
- d) El agua subterránea requiere inversiones iniciales pequeñas. Por el contrario, los costes de operación son grandes. Las inversiones en aguas superficiales son altas, mientras que los costes de operación son normalmente reducidos. Las inversiones en el caso de aguas superficiales suelen ser indivisibles, lo que además, conlleva tiempos muertos largos en el estudio, construcción y proceso de toma de decisiones.

La eficacia total de las obras puede hacerse efectiva muchos años después de terminadas éstas. Las grandes inversiones implicadas imponen mayores exigencias en la información necesaria. Por el contrario, las inversiones en aguas subterráneas son muy divisibles y los tiempos muertos para la toma de decisiones son mucho menores. Esto presenta la ventaja adicional de ser mucho más adaptables a las demandas crecientes de agua.

En los casos muy corrientes en todo el mundo, en que la información hidrológica es incompleta y en que existe incertidumbre con respecto a la demanda futura de agua, las consideraciones anteriores son de importancia crucial. La situación de recesión económica de los últimos años ha influido decisivamente en reducir las expectativas de demanda de agua en muchas partes del mundo. El agua subterránea puede jugar un papel más importante si el sistema de recursos hidráulicos es concebido dinámicamente y teniendo en cuenta las incertidumbres existentes en los recursos y demandas, opuesto a una concepción estática orientada estructuralmente.

La demanda de agua en muchas regiones requiere mucha más agua que la disponible de forma permanente. A largo plazo, los recursos locales tienen que suplementarse con la cons-

trucción de costosas presas o canales, importando agua de otras regiones, reutilizando aguas residuales o desalinizando el agua del mar o salina. El proyecto, financiación y construcción de estas obras requiere mucho tiempo e información, que se puede conseguir con la sobreexplotación temporal de los acuíferos si se planifica adecuadamente. Además, se pueden obtener ganancias económicas sustanciales en muchos casos. Aunque en cada caso, la mejor solución debe obtenerse por un análisis riguroso de las diferentes alternativas, puede darse una estrategia de actuación válida, en particular para proyectos de nuevo desarrollo de recursos hidráulicos. Se puede empezar con la explotación de aguas subterráneas según lo vaya requiriendo la demanda. El agua subterránea se puede utilizar por encima del «caudal seguro» utilizando las reservas almacenadas una sola vez. Mientras tanto, se pueden construir las obras de aprovechamiento de los caudales superficiales. Las etapas posteriores pueden incluir el uso conjunto de unos y otros recursos, en los que las aguas subterráneas pueden cubrir los picos en las demandas, explotarse más en períodos secos o estiaje, pudiéndose llegar a la necesidad de hacer uso de la recarga artificial en etapas más avanzadas. En Israel la sobreexplotación ha sido un elemento crucial en la planificación de los recursos hidráulicos.

Se han llevado a cabo dos ciclos de sobreexplotación y está previsto un tercero (Schwarz, 1980). En el Valle de las Vegas (Nevada) la sobreexplotación se ha utilizado con el fin de ganar tiempo para construir el trasvase del Colorado, el Southern Nevada Water Project (SNWP), y está previsto un segundo ciclo de sobreexplotación antes de desarrollar otros proyectos más costosos para importar agua de otras partes del Estado (Schulke, 1975).

4. OTROS ASPECTOS ECONOMICOS

A veces se argumenta que las aguas subterráneas son caras, cuando es frecuente que su coste sea inferior al de las aguas superficiales. De hecho, un coste reducido es muchas veces el causante de la sobreexplotación. Con alguna frecuencia se hacen comparaciones entre el coste de regular 1 m³. de agua en un embalse

y el de obtenerlo de un pozo. Para ser rigurosos habría que considerar además los costes de transporte, distribución y tratamiento del agua, que suelen ser claramente favorables al agua subterránea, (James and Lee, 1971). El único caso de comparación de costes a nivel nacional que conocemos es el de Francia, en el que el coste de producción bruta más tratamiento de agua de río es de 0,14 F/m³. y sólo de 0,09 F/m³. para el agua subterránea, (Erhard-Cassegrain y Margat, 1983). La comparación sería más desfavorable cuando además hubiera necesidad de construir presas de regulación.

La explotación de las aguas subterráneas produce externalidades como la disminución de niveles, reducción de caudales en los ríos o variaciones a largo plazo de la calidad del agua en zonas agrícolas. Pueden tenerse en cuenta con los métodos de análisis y modelación de acuíferos (Gorelick, 1983).

Otras externalidades son más difíciles de predecir y de valorar económicamente, como el de la subsidencia provocada por el descenso de niveles piezométricos en algunos acuíferos.

La selección de la tasa de descuento a utilizar en proyectos hidráulicos ha sido objeto de áridos debates. Una tasa pequeña favorece los proyectos con mayor componente de agua superficial. Una tasa más acorde con el precio real del dinero favorece el aplazamiento de las inversiones más costosas en obras superficiales. Para fijar ideas, el valor actual de un dólar que nos hemos de gastar dentro de diez años, es de 0,257 si utilizamos la tasa de descuento del 12 por 100, y de 0,104 si el gasto se ha de hacer dentro de 20 años. Si utilizamos el 8 por 100, los valores respectivos serían 0,463 y 0,215 y con el 4 por 100 0,676 y 0,456.

Los proyectos basados en aguas subterráneas presentan la ventaja de exigir inversiones menores por unidad de producto resultante, lo que las hace más idóneas en situaciones de escasez de capital y tipos de interés elevado; por otra parte, al ser mucho menores las inversiones comprometidas, es menor el riesgo frente a incertidumbres de tipo hidrológico y de mercados; y como la producción de agua se puede escalar adaptándola a la evolución de la demanda, se pueden reducir al mínimo las in-

versiones improductivas. Por el contrario, la economía de escala es una ventaja clásica evidente de las aguas superficiales.

En los años 50 se utilizó en la mayoría de los países una tasa de descuento de tipo social significativamente más baja que la del mercado. En los 70 se aplicó una tasa de descuento mucho mayor, de acuerdo con el mayor coste del dinero (James and Rogers, 1979). Aparentemente, la crisis de la energía va en contra de la utilización de las aguas subterráneas, aunque de hecho, el aumento de la tasa de descuento compensa el mayor coste de la energía (Gómez de Pablos, 1974).

Otros aspectos económicos a tener en cuenta son los de las pérdidas en las redes de transporte y distribución del agua, más importantes en general para las aguas superficiales, y la evaporación de los embalses. Se han citado pérdidas totales por evaporación de embalses en la URSS del 10 por 100 del total regulado; pérdidas del 16,4 por 100 en las redes de derivación para riegos en USA y del 75 por 100 en el canal de Carpentras en Provenza (Erhard Cassegrain y Margat, 1983).

En los últimos años se han producido algunos cambios importantes en la óptica de la planificación y gestión de los recursos hidráulicos. Han surgido dudas sobre la utilidad de las soluciones estructurales, se ha puesto más interés en la utilización más adecuada de las facilidades existentes en contra de mayores inversiones en nuevas, y en muchos países, la época de grandes construcciones en presas probablemente ya ha pasado (Willeke, 1979). Aunque se han realizado pocas evaluaciones financieras del resultado de algunos proyectos, hay acumuladas evidencias suficientes para poner en duda el que muchos de los proyectos construidos hayan sido tan beneficiosos como se esperaba de ellos. El problema del subsidio por parte de los gobiernos a las grandes obras hidráulicas se ha puesto frecuentemente en tela de juicio, y la idea de solución deja paso a la de análisis entre diversas alternativas.

5. PANORAMICA MUNDIAL

5.1. Propósito

Dado el carácter de este artículo, parece más adecuado continuar con un apartado de tipo expositivo en el que se presenten algunas de las realizaciones o estudios más relevantes. Con ello se pretende sacar enseñanzas en cuanto a las posibilidades reales de la utilización conjunta y poder definir una tipología. Para ello seguiremos de forma prácticamente idéntica un trabajo anterior del autor (Sahuquillo, 1983 a).

Nuestro interés está en las etapas iniciales de la concepción de un sistema de recursos hidráulicos, para presentar al ingeniero hidráulico y al planificador una serie de opciones y soluciones que puedan estimular su creatividad. Esta creatividad es el punto de partida imprescindible a la que tienen que subordinarse todos los medios de análisis, que tienen que estar concebidos para dar respuesta a las incógnitas o problemas que se planteen en cada una de las alternativas imaginadas.

5.2. El uso conjunto en California

El interés de presentar las realizaciones de California reside en el hecho de ser la parte del mundo donde se han realizado estudios más completos, y donde hay realizaciones más espectaculares sobre la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas.

California tiene unas características similares a España. Es algo menor en extensión, unos 400.000 Km². y con menor número de habitantes, unos 25 millones. También tiene dos zonas hidrológicamente distintas, una húmeda al norte, donde existe superávit de agua y otra al sur, árida. La población está concentrada en las zonas costeras, fundamentalmente en el sur, donde vive más del 50 por 100 de la población del Estado. La escorrentía media de sus ríos es algo menor que la española, no alcanza los 100 Km³. (incluyendo 5,8 que se derivan del río Colorado), y la capacidad de sus embalses es del orden de 39 Km³. similar a la española, unos 46 Km³. Los usos agrícolas son con mucho los más importantes, 41 Km³. (83,4 por 100 del total del agua aplicada), con los que se riegan casi 4 millones de hectáreas.

Las aguas subterráneas han suministrado en los últimos años del orden del 50 por 100 del total requerido para usos urbanos y agrícolas. Se está haciendo un uso muy amplio de la utilización conjunta aprovechando la capacidad de almacenamiento y distribución de los acuíferos, de la recarga artificial 5,2 Km³/año, y, en parte, del agua almacenada en los mismos. Se estima que la capacidad de almacenamiento de los acuíferos es de unos 1.600 Km³, de la cual se pueden utilizar del orden de 140. En los últimos años se está prestando un interés especial a la contaminación, tanto de aguas superficiales como subterráneas, al control de avenidas y a los aspectos ambientales y ecológicos. En 1955 se estimaba que la sobreexplotación de las aguas subterráneas era de casi 5 Km³/año. Desde esa fecha se ha reducido por el desarrollo de nuevos proyectos de aprovechamiento superficial, por la importación de cuencas excedentarias y por el uso conjunto. No obstante, la sobreexplotación actual se estima que está comprendida entre 2,5 y 3,1 Km³/año, de los cuales, 1,9 se producen en el Valle de San Joaquín (California State Water Resources, 1982). Esta sobreexplotación ha provocado bajadas de niveles piezométricos que han originado intrusión marina y subsidencia en varias zonas del Estado. Sin embargo, conviene decir que la sobreexplotación, aunque no ha sido planificada, ha hecho posible el rápido desarrollo agrícola, industrial y urbano, sobre todo en las zonas costeras del sur. Una de las razones de la prosperidad económica de California se atribuye a este hecho (C.S.D.W.R., 1970, pág. 71), lo que ha permitido llevar a cabo otros proyectos más costosos entre ellos los trasvases desde otras cuencas excedentarias.

En las zonas lluviosas también juegan un papel importante las aguas subterráneas en la satisfacción de las necesidades actuales y futuras (del orden del 20 por 100). También se ha planificado la sobreexplotación temporal de algún acuífero en estas zonas húmedas, con la finalidad de diferir en el tiempo proyectos más costosos (C.S.D.W.R., 1970, pág. 95 a 142).

El desarrollo de los recursos hidráulicos en California:

El California Water Plan

El desarrollo de los recursos hidráulicos en California se vino realizando por medio de proyectos aislados de las diversas agencias que se ocupan de los problemas del agua en el Estado, o por la iniciativa privada. Pero para hacer frente a los problemas crecientes de agua que planteaba el rápido desarrollo demográfico y económico, se elaboró el California Water Plan (C.S.D.W.R., 1957, Bull. núm. 3).

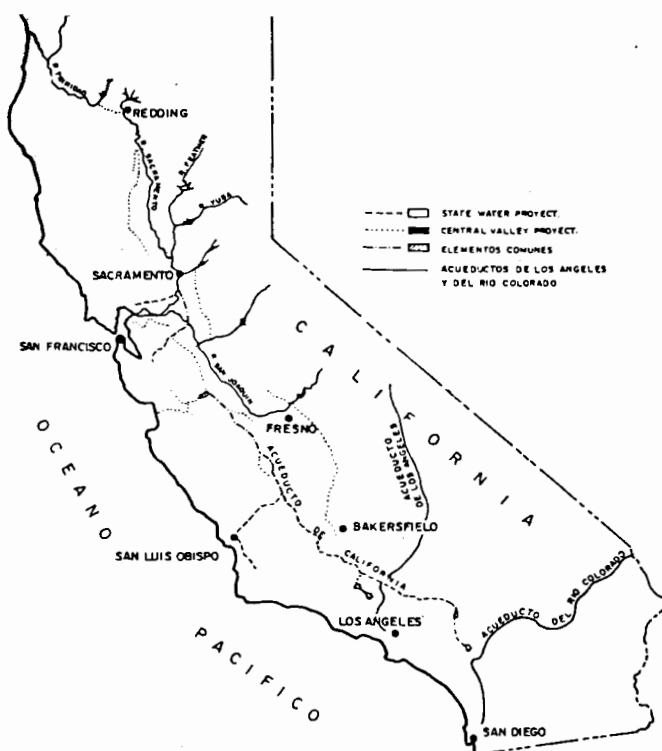


Figura 1.—State Water Project y Central Valley Project.

Tabla 1

DATOS DEL ESTUDIO DE USO CONJUNTO EN EL VALLE CENTRAL

(Según C.S.D.W.R., 1957)

Almacenamiento superficial requerido . . .	27.000 Hm ³
Almacenamiento subterráneo	37.000 Hm ³
Porcentaje de la demanda satisfecha con agua subterránea en un período:	
— Seco	67 %
— Medio	45 %
— Húmedo	25 %
Máxima capacidad de bombeo	1.150 m ³ /s.
Profundidad del nivel freático	9 m.
Profundidad máxima media del nivel freático	21 m.

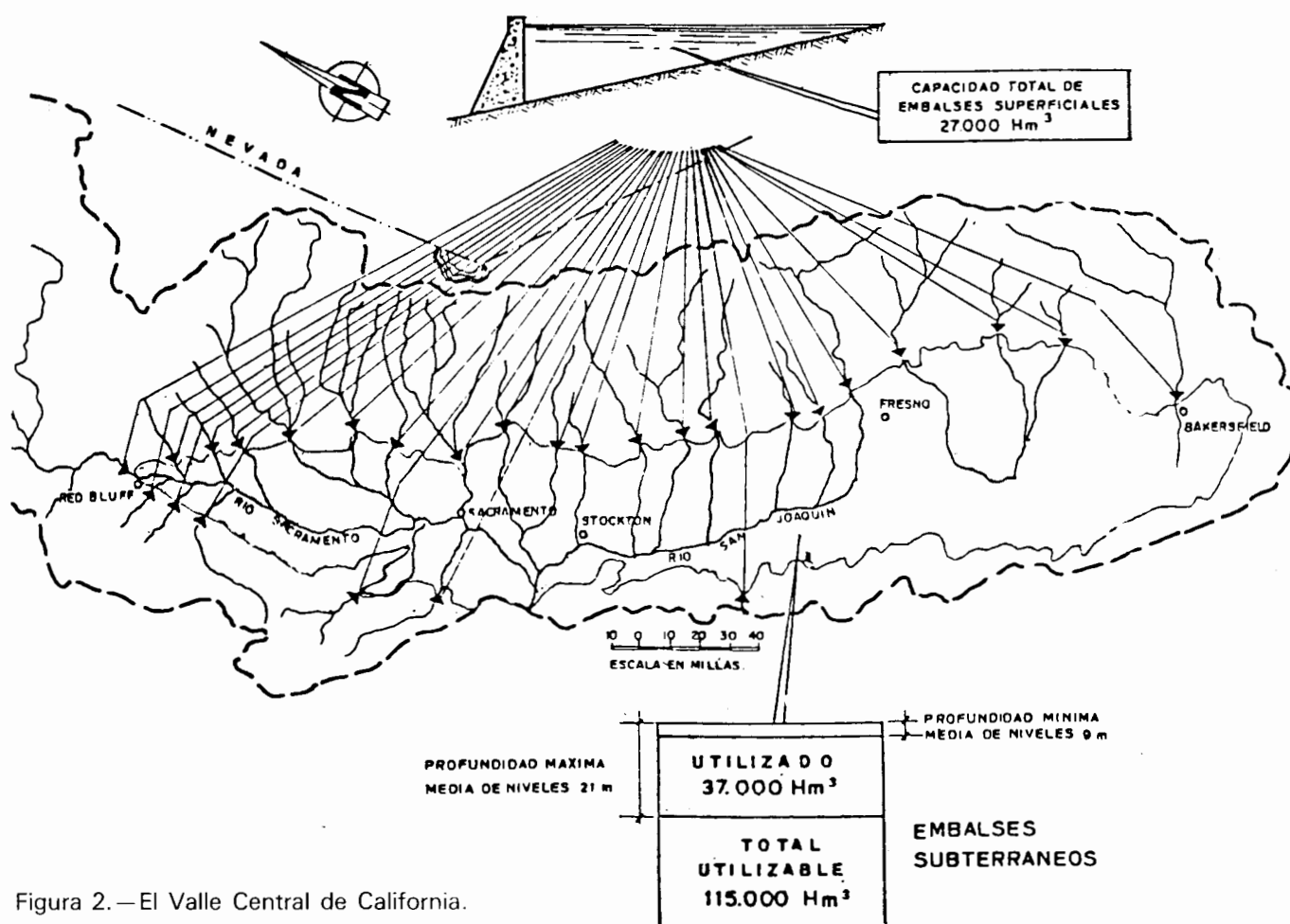


Figura 2.—El Valle Central de California.

El California Water Plan es un «Master Plan» que valora los recursos hidráulicos, estima las necesidades y problemas actuales y futuros, indica el superávit y el déficit en cada zona del Estado, sugiere la forma de utilizar los recursos hidráulicos y hacer frente a los problemas, y propone los objetivos hacia los que debe dirigirse el desarrollo de los recursos hidráulicos. Incluye asimismo trabajos locales para satisfacer las necesidades de las distintas zonas, así como proyectos cuyo objetivo es el de la redistribución del agua excedente en las cuencas del norte hacia las cuentas deficitarias del sur.

Dos proyectos que cumplen este último objetivo, son: el Central Valley Project, del Bureau of Reclamation (fig. 1), ya iniciado en 1973, que suministra anualmente para usos agrícolas, del orden de 7.000 Hm^3 , a los valles de San Joaquín y Sacramento y llegará a unos 13.000 en 1990; y el State Water Project, del Departamento de Recursos Hidráulicos, antes denominado

Feather River Project, iniciado en 1957, con 21 presas, 6 centrales hidroeléctricas y 22 centrales de bombeo, siendo la longitud total de sus acueductos que transportan agua desde el río Feather hacia el centro y sur de California —incluyendo canales, túneles y tuberías— de más de 1.100 Kilómetros. Este proyecto empezó a suministrar agua por primera vez al Sur de California en el año 1971 y llegará a trasvasar del orden de 5.000 Hm^3 /año.

El Valle Central

Para satisfacer las demandas en el Valle Central, se estimó necesario un volumen de almacenamiento de 64.000 Hm^3 , de los cuales, 27.000 serían proporcionados por embalses superficiales y el resto, a través de la utilización conjunta, por los subterráneos, de los que sólo se emplearía el 32 por 100 de su capacidad (fig. 2).

Para hacer esto posible, el sistema permite proporcionar agua a las zonas regables, ya sea con una u otra fuente de agua. Estas zonas cubren el 75 por 100 de área regable. Para utilizar efectivamente el embalse subterráneo es necesario contar con una recarga suficiente, que además de la natural se obtiene por infiltración de excedentes de riego, de percolación en canales y redes de distribución de agua y una cierta cantidad de recarga artificial. Los bombeos se distribuirán más uniformemente, con lo que los descensos de nivel serán más uniformes.

La infiltración de excedentes de riego y la utilización de los acuíferos puede provocar un aumento en la concentración de sales. Este problema puede evitarse a través del control de la calidad del agua de recarga, por la distribución relativa en la cuenca de agua superficial y subterránea y con un drenaje adecuado para mantener el balance de sales en la cuenca.

De acuerdo con los primeros estudios realizados, se estimó que no sólo era posible satisfacer la demanda futura con esas premisas, sino que además, sería posible exportar del orden de 2.000 Hm^3 por año a otras áreas del Estado (C.S.D.W.R., 1957). De hecho, actualmente (datos de 1982, C.S.W.R.C.B. y C.D.W.R.) la sobreexplotación de aguas subterráneas en todo el Valle Central es del orden de 1.900 $\text{Hm}^3/\text{año}$. Esto cabe achacarlo no a un aumento de la demanda por encima de lo previsto o a un planteamiento equivocado, sino a la dificultad de llevar a cabo la solución prevista en el desarrollo y operación de un sistema muy extenso y complicado en el que intervienen agencias federales, estatales, de condado y locales, además de la iniciativa privada.

La zona costera del sur de California

Durante los últimos 60 años el sur de California ha estado intentando aumentar sus recursos. El primer esquema de importación desarrollado fué el acueducto del Valle de Owens a la ciudad de Los Angeles, que empezó a funcionar en 1913 y fué ampliado en 1970. Suministra unos 600 $\text{Hm}^3/\text{año}$ de agua. El acueducto del Colorado que comenzó en 1920, suministra casi 1.500 $\text{Hm}^3/\text{año}$. El esquema se completa con la importación del Norte de California a través del State Water Project (fig. 1).

Los trasvases de agua no han sido apoyados unánimemente y ha habido una oposición enorme en las áreas de origen. El trasvase del Colorado ha estado en litigio 36 años, litigio que se decidió en 1964, por el cual California perderá en 1985 más de la mitad del agua en favor de Arizona.

Los recursos superficiales locales son relativamente pequeños, algo más de 200 $\text{Hm}^3/\text{año}$, y no son apenas susceptibles de aumentarse. En toda la zona son escasas las obras de regulación superficial, dado lo elevado de su coste. El agua superficial se suele utilizar en esta zona a través de derivaciones y de recarga artificial o inducida en los cauces de los ríos. Los recursos subterráneos superan los 1.000 $\text{Hm}^3/\text{año}$.

Por último, está prevista la reutilización de casi 400 Hm^3 de aguas residuales, pudiendo aumentarse considerablemente esa cifra.

El Departamento de Recursos Hidráulicos de California ha sistematizado la realización de estudios que ha aplicado sistemáticamente a diversas zonas del sur de California. El objetivo de los mismos es desarrollar, analizar, comparar y publicar la información operativa y económica que se obtenga sobre la forma de utilizar los embalses subterráneos de una zona, conjuntamente con los elementos superficiales, analizando un amplio margen de alternativas.

Los resultados de estos estudios sirven de guía a las agencias locales que administran el agua en la región. Como todas las alternativas que se estudian, satisfacen la demanda actual y futura del agua, y hay otros factores en juego, políticos, legales, sociales y administrativos, que pueden llegar a pesar más que los económicos; se considera que la decisión última de la utilización del agua debe estar en manos locales «puesto que ellos son lo que mejor conocen su situación local». (C.S.D.W.R. 1972, Bull. 104-7).

La primera zona en la que se realizó este tipo de estudios fué la Llanura Costera de los Angeles (C.S.D.W.R., 1966, Bull. 104), que fue donde se desarrolló su sistemática. Esta zona, de unos 1.500 Km^2 , tiene actualmente unos 5 millones de habitantes y una demanda de unos 1.200 $\text{Hm}^3/\text{año}$. En el año 1990 se esti-

man 5,2 millones de habitantes, siendo la demanda entonces de unos 1.500 Hm³/año.

En el sur de California se utilizan los embalses subterráneos para almacenar, transmitir y distribuir agua en una zona, coordinándolos con los elementos superficiales —embalses, depósitos, canales y tuberías—, con objeto de satisfacer las necesidades de agua de la forma más eficiente y económica. En la figura 3 se puede ver un esquema ilustrativo del sistema de aprovechamiento de recursos hídricos en esta región.

En los acuíferos costeros se ha estudiado la forma de prevenir la intrusión marina por medio de barreras de inyección de agua en la línea de costa, o recargando en el interior para conseguir un gradiente positivo hacia el mar. En general, ha resultado más conveniente la primera opción, con la que es posible la sobreexplotación temporal de los acuíferos y el aprovechamiento de parte de las reservas de agua almacenadas.

Las alternativas a considerar dependen de una serie de variables, siendo las más importantes:

- Bombeo anual de los acuíferos.
- Distribución espacial de los bombeos.
- Método de impedir la intrusión marina.
- Cantidad de agua a recargar.

La combinación de todas las posibilidades proporcionó 3.400 alternativas en el caso de la Llanura Costera de los Angeles, que se redujeron a 58 después de algunos análisis preliminares.

La secuencia general de los estudios hechos por el Departamento de Recursos Hídricos de California incluye la realización de estudios de demanda de agua, hidrológicos e hidrogeológicos; de modelos matemáticos de los sistemas superficial y subterráneo; la formulación de las distintas alternativas y su simulación y el análisis económico de los resultados. En la figura 4 puede verse una representación esquemática.

Se han hecho estudios detallados de algunas alternativas seleccionadas; estos estudios pueden variar, desde el análisis de la posibilidad de producir subsidencia en el terreno por el efecto de la explotación de los acuíferos, hasta investigaciones más detalladas de la fiabilidad del modelo matemático del acuífero, un análisis de las fluctuaciones previstas en los niveles freáticos, el análisis económico más detallado de estos planes o un estudio de los cambios de determinados factores en los costes, como pue-

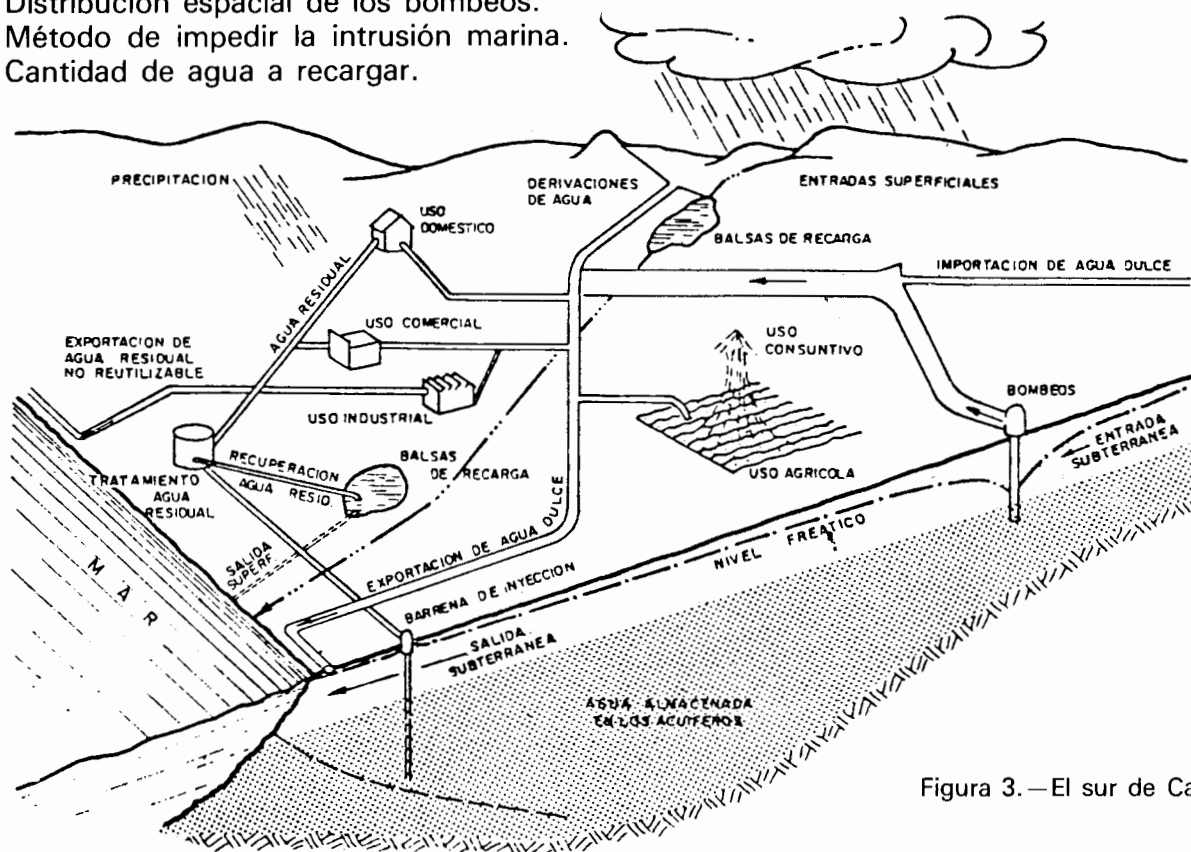


Figura 3.—El sur de California.

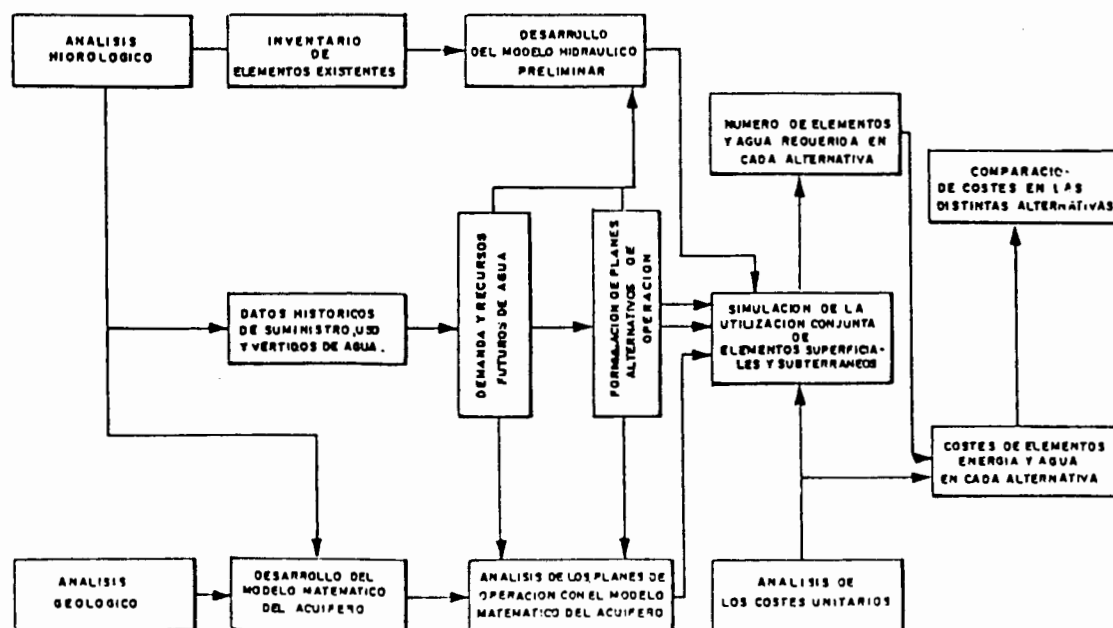


Figura 4.—Sistemática utilizada en el Sur de California.

de ser el de las variaciones en el precio del agua importada.

En los estudios más recientes también se han tenido en cuenta los cambios que se podrían producir en la calidad del agua superficial y subterránea. Los resultados también se han incluido en la valoración económica como una penalización por el exceso de TDS sobre un cierto límite (C.S.D.W.R., 1972 Bull. 104-7).

Ultimamente el C.S.D.W.R. está realizando estudios de utilización conjunta en los que se contempla el almacenamiento subterráneo de agua recargada artificialmente en los acuíferos en años húmedos (Coe, 1979). Otro esquema distinto estudiado recientemente es el de utilizar conjuntamente presas y acuíferos, bombeando más en años secos y suministrando más agua superficial en los húmedos. En este caso se ha demostrado como muy provechosa la previsión hidrológica a largo plazo. Previsión que se considera factible y confiable en un próximo futuro. La operación de los embalses se puede modificar, suministrando más agua cuando se prevé seco (Jaquette, 1981).

Sistemas río-acuífero

La utilización conjunta en el Reino Unido

En los últimos años se ha dado gran importancia en el Reino Unido a la utilización conjun-

ta. La posibilidad de poner en práctica esquemas a gran escala sólo ha sido posible por la promulgación de la ley Water Resources Act en 1963, que declaró el dominio público sobre todas las aguas del Reino Unido, y puso su gestión en manos de 29 agencias en distintas cuencas.

En 1971 se utilizaron 13.000 Hm³. de ambas fuentes, superficial y subterránea, para usos urbanos e industriales. El 25 por 100 del total procedía de acuíferos. Para el final de siglo se espera que la demanda de agua se duplique. Después de tomar en consideración la reutilización del agua, se necesitará una capacidad de almacenamiento adicional de 2.000 Hm³. una parte importante del cual será proporcionada por los embalses subterráneos, (Downing, 1975; Downing et al., 1976).

En el Reino Unido uno de los objetivos importantes es el de mantener unos caudales mínimos en los ríos. El caudal de un río se puede mantener por encima de un mínimo prefijado bombeando del acuífero en período secos. El agua subterránea también se puede bombear directamente a los centros de consumo. En cualquier caso, habrá que tener en cuenta el efecto de los bombeos sobre los ríos conectados con los acuíferos que se bombean.

El objetivo último es mantener el caudal de

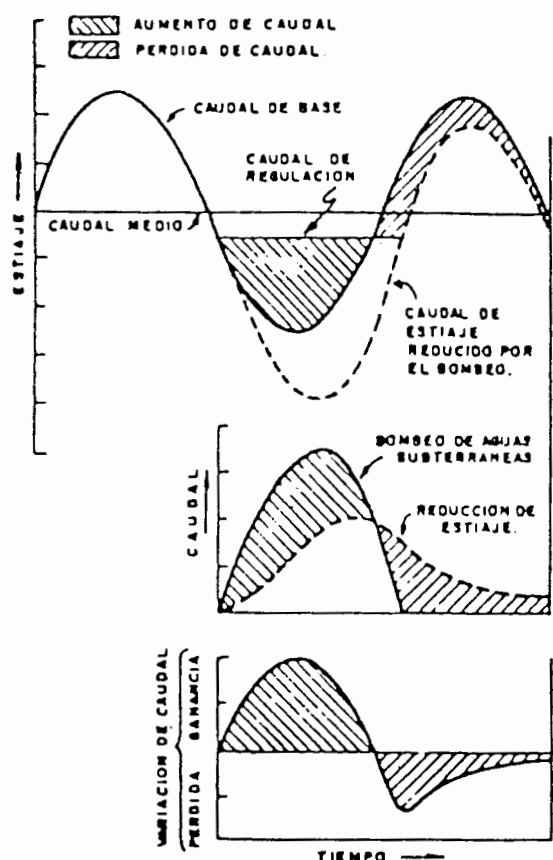


Figura 5. — Regulación del caudal de un río bombeando aguas subterráneas (Downing et al., 1979).

los períodos secos lo más regular posible, con el objeto de poder satisfacer, no sólo la demanda, sino también los usos estéticos, recreativos y ambientales de la aguas superficiales.

El esquema de funcionamiento puede verse en la figura 5. (Downing et al., 1979).

Los acuíferos más importantes del Reino Unido son: el de la creta, el de las calizas jurásicas y el de las areniscas triásicas. Ninguno de ellos puede considerarse de dimensiones ni siquiera medias, y además, tienen un coeficiente de almacenamiento pequeño; no obstante; el volumen total de agua almacenada en los mismos y la lentitud del flujo subterráneo permiten que el efecto de los bombeos sobre el caudal de los ríos se difiera sustancialmente en el tiempo, lo que permite afrontar con estos esquemas, incluso períodos de sequía de varios años y con períodos de recurrencia largos.

Los estudios realizados en el Reino Unido y los criterios y técnicas utilizados están entre los más avanzados y a la vez, más pragmáticos. Las

diversas etapas de un estudio suelen dedicar, entre otros aspectos, un énfasis importante a las relaciones acuífero-río, a los trabajos experimentales de campo para definir estas relaciones y las características de los acuíferos a los modelos de simulación, ya sea de acuíferos o de utilización conjunta, y a la operación experimental, antes del desarrollo completo de esquemas demostrativos en zonas piloto. Los caudales a movilizar en estas zonas piloto tienen que ser necesariamente importantes, dado el efecto diferido sobre el caudal de los ríos, que es uno de los efectos que interesa determinar.

En la figura 6 presentamos el esquema del modelo de simulación empleado para el estuario del Wash, esquema muy repetido en los estudios de utilización conjunta en Inglaterra y Gales.

5.3. El South Platte y el Arkansas

Los acuíferos aluviales del South Platte y del Arkansas en Colorado son de características bastante parecidas y en ellos se han realizado algunos de los estudios más interesantes sobre la utilización conjunta de sistemas acuífero-río. En concreto, Jenkins, en 1968, desarrolló para el Arkansas el concepto del «Stream depletion factor». En el South Platte se han realizado multitud de estudios, tanto por el U.S. Geological Survey (Young y Bredehoeft, 1972; Bredehoeft y Young, 1983) como por la Universidad del Estado de Colorado (Morel-Seytoux, et al., 1973; Andreu, 1982).

Refiriéndonos más concretamente al South Platte, drena una cuenca de 63.000 Km². y es uno de los mayores afluentes del Missouri; en su parte más oriental atraviesa una zona llana de clima semiárido, con una precipitación media del orden de 400 milímetros. Es en esta zona de casi 200 kilómetros, de longitud donde a un lado y a otro del río, en una anchura variable entre 6 y casi 10 kilómetros, está localizado el acuífero aluvial, encajado entre formaciones prácticamente impermeables. El acuífero es libre, con niveles de agua decreciendo hacia el río, que es ganador. Las profundidades hasta el nivel del agua oscilan entre 3 y 30 metros, y el espesor saturado entre 0 y 70, aunque la media es del orden de 9 metros.

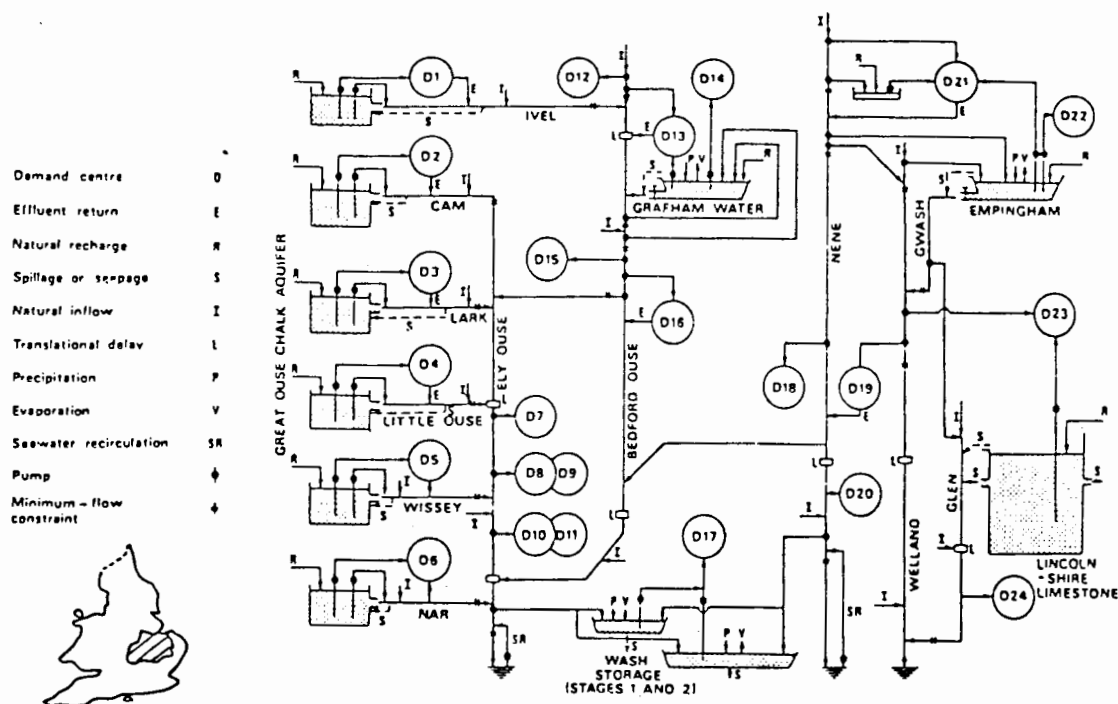


Figura 6.—Modelo de simulación del estuario de Wash (Downing, 1975).

El agua superficial se deriva directamente para riego o se almacena en tres embalses laterales para una utilización posterior. La doctrina legal imperante en Colorado es la de apropiación o «primero en el tiempo, primero en el derecho», y el agua se distribuye según esta prioridad legal. A principios de siglo la mayor parte del agua disponible había sido «concedida». De hecho, los usuarios con prioridad posterior consiguen agua proveniente de retornos de riego.

Se empezaron a construir pozos para riego en 1900, aunque no se empezaron a aprovechar de forma importante hasta 1934. En la década del 50, coincidiendo con una época seca, los regantes instalaron gran cantidad de pozos para completar agua para los cultivos. De 1956 a 1962 se paró esta actividad debido a la disponibilidad de aguas superficiales por encima de lo normal. Otra época de construcción de pozos fue la de 1962-1965.

El bombeo de los pozos ha ido afectando el caudal del río, que ha ido decreciendo progresivamente. No obstante, el desfase entre el bombeo y la afección ha permitido aprovechar una mayor cantidad total de agua, y el ingeniero del Estado ha incluido en los derechos del agua las interrelaciones río-acuífero.

Con este motivo y con el de optimizar el aprovechamiento, se han realizado gran cantidad de estudios de simulación y optimización, con los que se ha demostrado que es posible conseguir un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales, incluso con bombeos menores, (Andréu, 1982).

También se ha investigado la conveniencia de tomar o no algunas acciones, como revestir canales con filtraciones de agua, aumentar el almacenamiento superficial, mejorar la eficiencia de riego o aumentar la capacidad de bombeo. (Morel-Seytoux et al.). La conclusión es que la acción más efectiva es la de aumentar la capacidad de bombeo, o ésta combinada con la mejora de la eficacia de riegos. Bredehoeft y Young, 1983, han encontrado otra conclusión muy interesante y es que los usuarios de agua en la zona han llegado de forma espontánea a una solución en que la capacidad de bombeo es por sí sola capaz de satisfacer las demandas de riego de los años más secos. La solución «óptima» supone la instalación de una capacidad de bombeo menor, pero esto supone una especie de seguro contra las sequías con un coste pequeño. En el río Arkansas los estudios realizados han demostrado que se puede pasar

de 750 Hm³/año a 1.070 Hm³/año garantizados (Taylor y Luckey, 1974).

5.4. Israel

Israel es, sin duda, el país donde se hace, en relación al total de sus recursos hidráulicos, mayor uso del uso conjunto, y donde el detalle y refinamiento de los estudios realizados ha alcanzado mayor sofisticación.

El sistema de recursos hidráulicos de Israel está basado en lo siguientes elementos (Vardi, 1980), (fig. 7):

- En la parte norte del país, el agua del Jordán que fluye al lago de Tiberíades, situado a 210 metros bajo el nivel del mar.
- Los dos acuíferos más importantes del país, situados en la parte central, el costero en arenas y areniscas y el calizo Yarkon-Tanimín.
- Un sistema de transporte y distribución que interconecta los recursos anteriores y forma de espina dorsal de todo el sistema, conectándolo además con todos los usuarios. El conducto principal transporta agua del lago Tiberíades al Centro y Sur de Israel. Es la National Water Carrier.

Para integrar todos los recursos se hace uso muy amplio de la recarga artificial. También durante las primeras etapas de desarrollo, antes de construir la National Water Carrier, se sobreexplotaron temporalmente los acuíferos.

La necesidad de almacenamiento preciso para hacer frente a las variaciones hidrológicas es de unos 4.500 Hm³. Los acuíferos pueden proporcionar la mitad y el lago Tiberíades unos 500-600 Hm³. El hacer un uso mayor del almacenamiento en los acuíferos puede poner en peligro la calidad de los acuíferos por intrusión salina, ya sea del mar o de zonas de agua subterránea salina.

Como están prácticamente aprovechados todos los recursos, —el Jordán, los acuíferos y la interceptación y recarga de aguas de tormenta—, se hará uso de la reutilización de aguas residuales, 130 Hm³/año en el proyecto de Dan en realización, y 150 H³/año en otros a realizar en el futuro. También se prevé la utili-

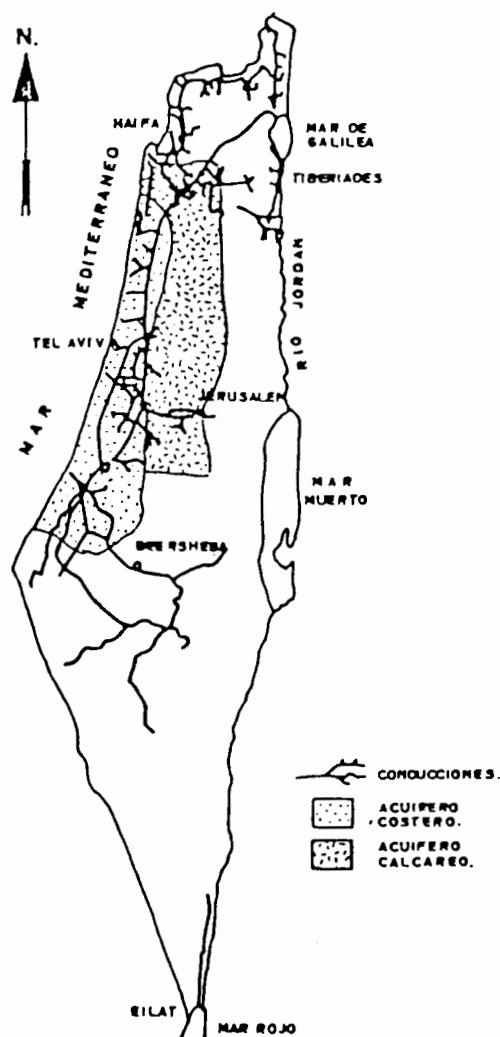


Figura 7.—El sistema de recursos hidráulicos de Israel (Modificado de Eiener, 1980).

zación de aguas salinas y la sobreexplotación adicional de unos 100 Hm³/año durante 10-15 años de los acuíferos, antes de recurrir a la desalación de agua de mar.

El uso conjunto en Israel incluye, además del almacenamiento y distribución por los acuíferos, a través de un uso muy amplio de la recarga artificial (que incluye también la interceptación de aguas de tormentas), su utilización como elementos de purificación y mezcla de aguas de distinta calidad (el agua del Tiberíades es más salina que la de los acuíferos), la sobreexplotación temporal (en las etapas actuales y en el próximo futuro) y la reutilización de aguas residuales a través de la recarga artificial. Uno de los problemas que más preocupan es el de la evolución futura de la calidad del agua, por la

concentración en sales de los excedentes de riego, el aumento de nitrato y la contaminación potencial de los acuíferos por sustancias tóxicas (Mercado, 1980).

5.5. La utilización conjunta como método para solucionar problemas de drenaje. La cuenca del Indo.

La llanura del Indo en el Pakistán tiene la zona regada más extensa del mundo; más de 13 millones de hectáreas están dominadas por un sistema complejo de canales, que derivan agua del Indo y sus afluentes, el Kabal, el Jhelum, el Chenab, el Ravi y el Sutlej. El complejo comprende 43 grandes canales con una longitud de más de 60.000 Kilómetros; 15 de ellos tienen una capacidad entre 280 y 600 m³/seg. También hay una serie de presas entre las que están la de Mangla, con 5.500 Hm³. de capacidad en el Jhelum, y la de Tarbela, con 10.600 en el Indo (Chaudry y otros, 1974).

El esquema empezó a desarrollarse a finales del siglo pasado. La mayor parte de los canales estaban sin revestir, de forma que tienen filtraciones muy grandes que alimentan al enorme acuífero subyacente. Se estima que su capacidad de almacenamiento en los 30 metros, superiores está comprendida entre 350.000 y 500.00 Hm³. Su espesor supera los 300 me-

tros, en muchas zonas. El nivel freático ha ido subiendo progresivamente (fig. 8). En la actualidad una superficie muy grande de terreno regable está con el nivel freático a menos de un metro de la superficie. Esto hace que el cultivo sea imposible; además, la proximidad del agua a la superficie ocasiona una evaporación importante, con la consiguiente acumulación de sales en la zona radicular.

Se ha estimado que cada año pierden para el cultivo 25.000 hectáreas de terreno (Fiering, 1971).

Este problema se ha estudiado con mucho detalle por el Grupo de Recursos Hidráulicos de la Universidad de Harvard y por la AID. La solución consiste en perforar unos 32.000 pozos, con los que se bombearían unos 70.000 Hm³. de agua por año para, por una parte, rebajar el nivel freático y aliviar el problema de la salinidad y el drenaje, y por otra parte, el agua bombeada se mezclaría con la superficial y se utilizaría conjuntamente con ésta. La utilización conjunta consigue además un mejor aprovechamiento del agua superficial, parte de la cual se pierde al mar en la época de los monzones.

El resultado de 78 simulaciones del equipo de Harvard indicaba que los pozos debían estar espaciados aproximadamente 2 Kilómetros, que su caudal debía ser aproximadamente de

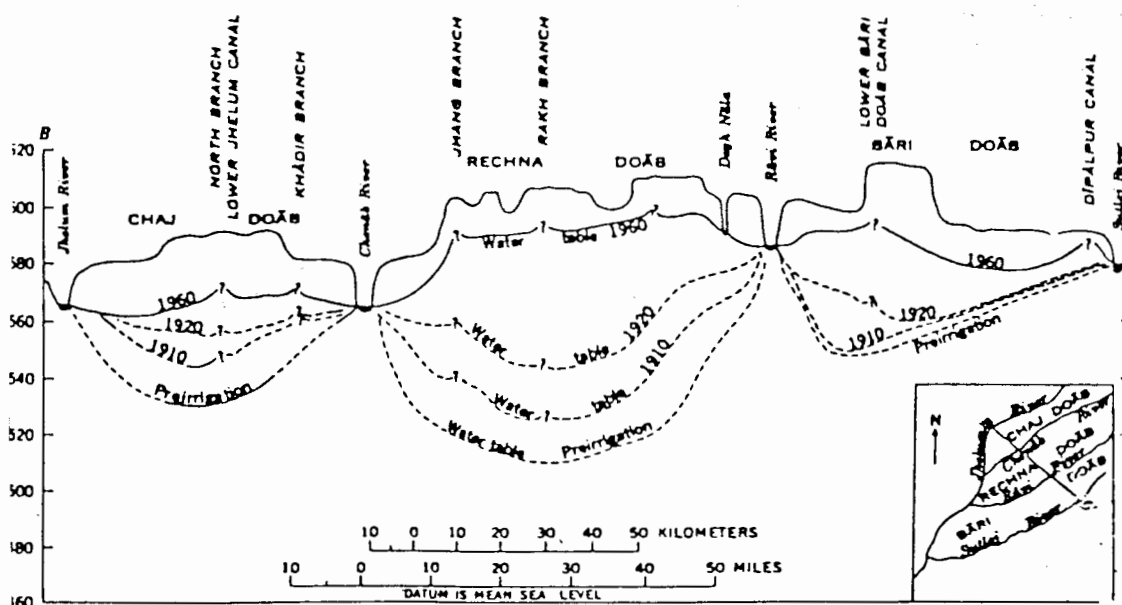


Figura 8.—Niveles freáticos en la Llanura del Indo (Greenman et al., 1967).

100 l/seg., que no debían revestirse los canales, y que no debía construirse un sistema de drenaje superficial.

5.6. Recarga inducida en el Ganges

La cuenca del Ganges tiene problemas muy serios de agua, debido a la dificultad de su almacenamiento en época de monzones, dado lo limitado de las posibilidades de almacenamiento superficial. La cuenca cubre una superficie de casi 800.000 Km². y tiene la décima parte de la población mundial. El crecimiento de la población es del 2,5 por 100 y es uno de los mayores del mundo. Aproximadamente el 77 por 100 de la misma se ocupa en la agricultura y su renta per cápita es una de las más bajas del mundo, unos 100 dólares en 1979.

Se han sugerido tres esquemas para almacenar el agua de la época monzónica (Chaturvedi y Sivrastava, 1979):

- Bombear intensamente para regar en la época anterior a los monzones en los acuíferos conectados a ríos no perennes.
- Se propone regar por medio de canales en la época de los monzones y bombear de los acuíferos en las épocas secas de invierno y verano. El riego con agua superficial en la época monzónica se propone hacer a través de canales no revestidos con capacidad para llevar la demanda de riego en esa época más el agua a recargar. Los canales para riego en época no monzónica deben ser revestidos (fig. 9).

Chaturvedi y Srivastava (1979) han hecho un estudio preliminar en el que deducen que la ter-

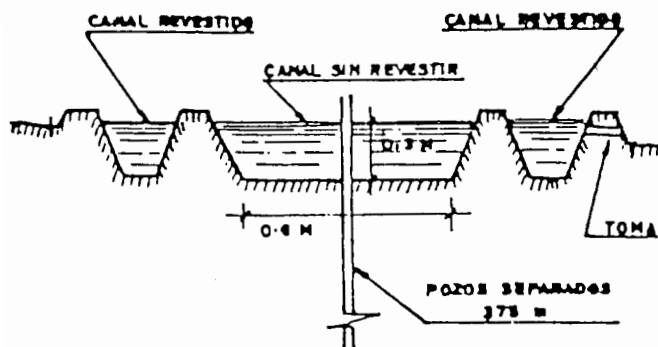


Figura 9. — Esquema de riegos y recarga artificial propuestos para el Ganges.

cera solución es en general la más conveniente. Con ella se podrían obtener 2,25 m³/seg. por kilómetro de río. También indican que los esquemas no son excluyentes. En el Punjab, en el Oeste, y donde todos los ríos perennes tienen almacenamiento superficial, el esquema b) puede ser interesante. En el Suroeste, donde hay aguas subterráneas salinas, también puede ser interesante el esquema b). En Uttar Pradesh y Bihar, en la zona central y occidental del Ganges, donde después de almacenar toda el agua posible durante los monzones, aún queda mucha agua disponible, los esquemas a) y c) pueden ser los adecuados.

5.7. Regulación de manantiales

La regulación de manantiales cársticos se ha realizado en España y otros países con cierta frecuencia.

El aprovechamiento clásico de los grandes manantiales en España ha sido el de riegos y en menor medida, el de abastecimientos, y ha estado muy por debajo de la aportación media, debido a las siguientes razones:

- Variabilidad de aportaciones, tanto estacional como anual.
- Concentración estacional de la demanda en el caso de riegos en la época de menores aportaciones.
- Localización de los manantiales en cotas bajas y valles abiertos y en puntos en los que por razones topográficas o geológicas cuesta muy caro o es imposible construir presas.

La solución propugnada por el SGOP en la mayoría de los casos en que ha intervenido, ha sido la de construir pozos en las inmediaciones del manantial, con lo cual la afección es inmediata. Para regular el manantial es necesario bombear en verano caudales grandes, con lo cual éste se seca. La ventaja se obtiene al disponer del agua al pie de los canales o conducciones existentes, en la poca altura a la que normalmente hay que elevar el agua y a los caudales elevados que en general se obtienen (550 l/seg. por pozo en Deifontes, 750 l/seg. en un pozo en el Río de los Santos, etc.).

Estos esquemas se han utilizado conjuntamente con otros acuíferos o sistemas superfi-

ciales, sobre todo en algunas zonas del Mediterráneo español (Sahuquillo, 1983, b).

5.8. Realizaciones españolas

Además de las ya citadas, en nuestro país hay algunas realizaciones de uso conjunto. Por otra parte, se están llevando a cabo estudios concretos sobre las posibilidades de su implantación en varias cuencas, sobre todo del Litoral Mediterráneo.

Desde hace tiempo se practica el uso conjunto en la cuenca baja del Llobregat. Las etapas del uso conjunto han sido las siguientes (Custodio y otros, 1977):

- Solución de las primeras necesidades de abastecimiento concentradas en las aguas subterráneas.
- Progresiva introducción de las aguas superficiales en los esquemas de aprovechamiento.
- Protección del embalse subterráneo contra la contaminación y la intrusión marina.
- Mantenimiento de la recarga del río al acuífero mediante acciones de recarga artificial y recarga de sobrantes de agua tratada para el abastecimiento a Barcelona.

En la Marina Baja el sistema de aprovechamiento de los recursos hidráulicos consta de dos embalses, Guadalest y Amadorio, con aporta-

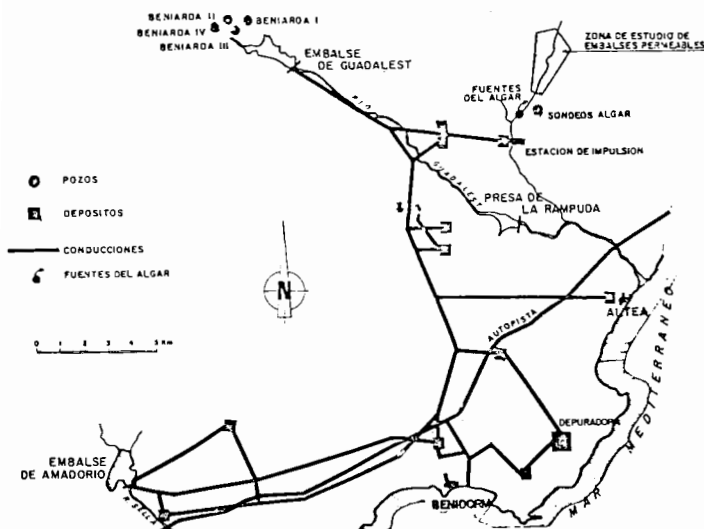


Figura 10. — Sistema de aprovechamiento de los recursos hidráulicos en la Marina Baja.

ciones medias pequeñas, 8,2 y 5,6 $\text{Hm}^3/\text{año}$ y además muy variables; dos acuíferos, los de Beniarda y Algar, una planta depuradora de aguas residuales y la red de canales y conducciones que pueden verse en la figura 10.

El manantial del Algar drena el acuífero de su mismo nombre y tiene una aportación media de 25 $\text{Hm}^3/\text{año}$, pero con oscilaciones entre 51 y 8 $\text{Hm}^3/\text{año}$, pudiendo superar sus caudales los 10 $\text{m}^3/\text{seg.}$ y bajar de 100 l/seg. Hasta muy reciente el manantial ha sido aprovechado sin regulación de ningún tipo. En 1976 se terminaron las obras de bombeo hasta el embalse de Guadalest, con una longitud de 10 Kilómetros, y salto manométrico de 250 metros.; su capacidad de elevación es de 1.100 l/seg.

El uso conjunto se inició con motivo de la sequía que comenzó en 1978. Puede afirmarse que la explotación de los acuíferos ha hecho posible el suministro de la demanda y el abastecimiento de forma casi satisfactoria a través de la prolongada sequía que padeció el país y con especial acritud la zona (ver fig. 11).

La Plana de Castellón (fig. 12), es una de las zonas del país en la que sin duda se han hecho estudios más completos de utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas (Sánchez, 1983 a y b), (Marco, 1983), (Varela, 1983),

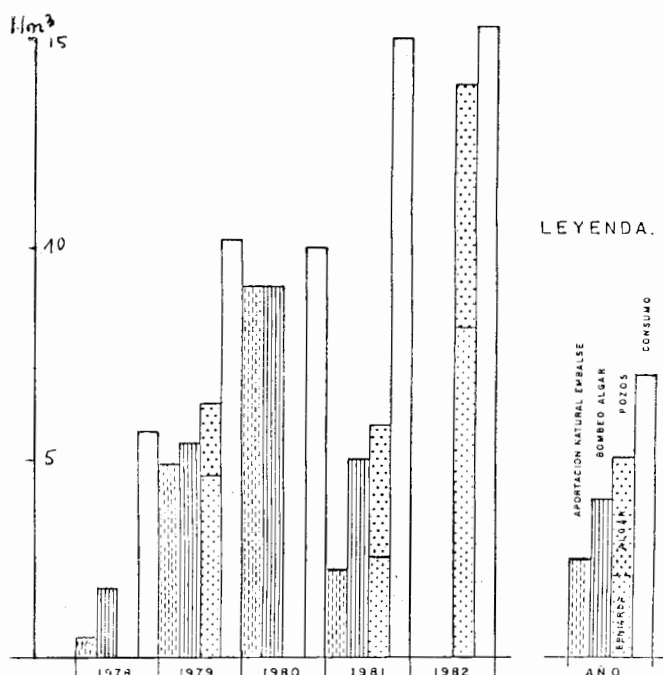


Figura 11. — Marina Baja. Aportaciones y Consumos.

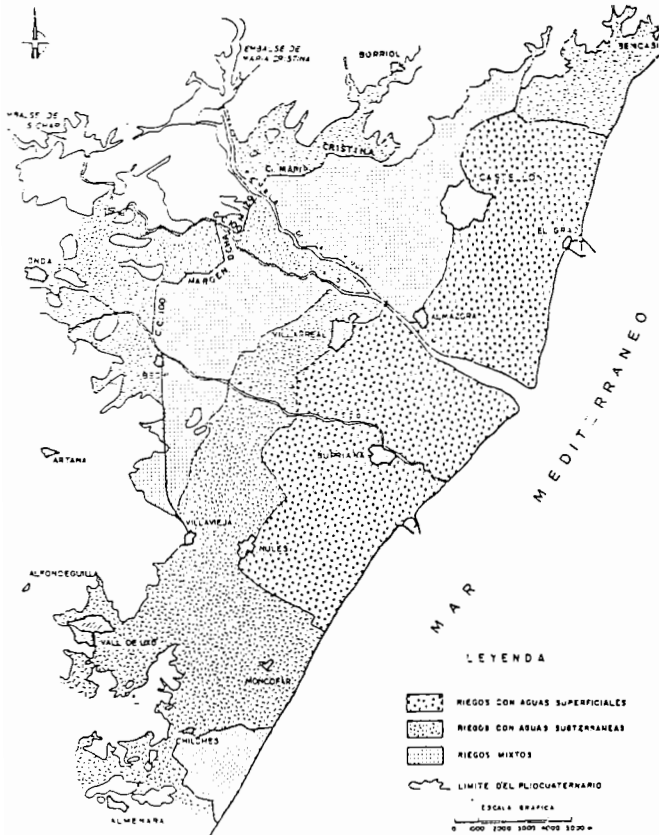


Figura 12.—Esquema de utilización conjunta. Plana de Castellón.

(Ferrer y Ramos, 1983). El sistema consta de tres embalses, dos en el río Mijares: Arenas, con 130 Hm³ de capacidad y Sicar con 50; uno en la Rambla de la Viuda, el de María Cristina, con 20 Hm³ de capacidad. Tanto los embalses de Sicar y María Cristina, como el río Mijares, alimentan al acuífero que es la principal fuente de recursos utilizados en la actualidad. En la figura 13 se puede ver un esquema detallado del sistema, en el que, además de los embalses citados y el subterráneo, se incluyen las centrales hidroeléctricas, tomas, conducciones y zonas de demanda de agua. El uso conjunto se hace utilizando más aguas superficiales en los años húmedos en aquellas zonas con riegos mixtos.

Recientemente se ha realizado una simulación de 36 alternativas que incluyen una simulación detallada del acuífero y de todo el sistema superficial. El objetivo es tratar de demostrar la viabilidad de resolver los problemas de sobreexplotación e intrusión marina en la parte sur de la Plana, aumentando las zonas con riegos mixtos, e incluso, tratando de aumentar las zonas de riego (Andréu, 1984).

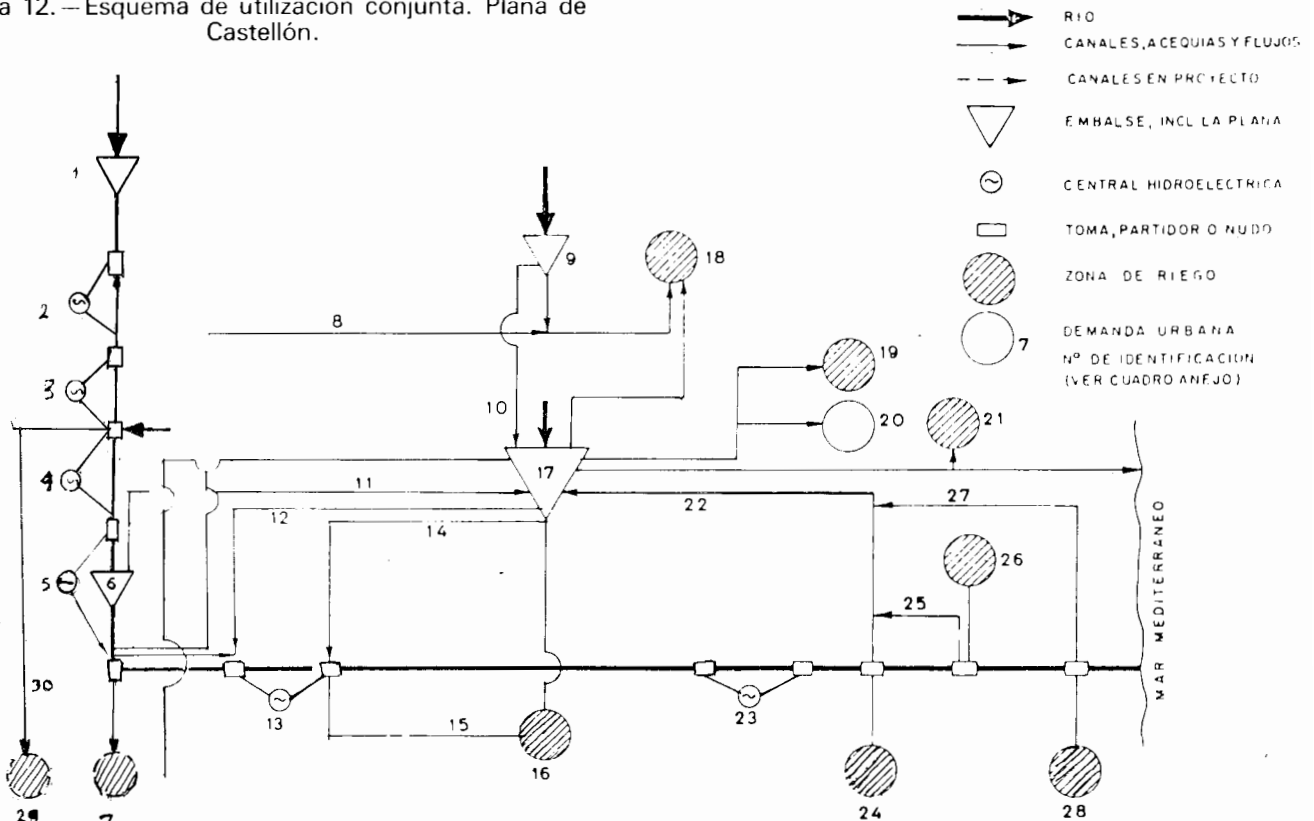


Figura 13.—Esquema detallado del sistema Mijares-Plana de Castellón.

Entre las posibilidades de aplicar el uso conjunto en zonas húmedas, está el abastecimiento de Santander, estudiado por el Servicio Geológico de Obras Públicas. Actualmente, Santander se abastece de los ríos Pisueña y Pas. En este último están los manantiales de la Molina, que disminuyen su caudal en los estiajes, haciendo que en los años más secos exista el peligro de restricciones. Con las captaciones del Pas y Camargo (fig 14), es posible aumentar en unos 500 l/seg. las disponibilidades en estiajes, cantidad que se podría aumentar si en invierno se recarga el acuífero de Camargo con aguas del Pas o Pisueña.

Para el abastecimiento de Madrid, también se han estudiado las posibilidades de utilización conjunta. Se ha elaborado un modelo del sistema de abastecimiento del Canal de Isabel II, que incluye las presas, conducciones y plantas de tratamiento (incluso las restricciones por deficiencias de calidad del agua a tratar) y usos ecológicos en los ríos situados aguas abajo de los embalses. Para el funcionamiento del acuífero se ha elaborado un modelo casi tridimen-

sional que se ha simulado de acuerdo con los resultados del modelo superficial (López-Camacho y Varela, 1983).

Además se han estudiado las posibilidades de uso conjunto de cuencas enteras o subcuencas en los ríos Duero Ebro, Guadiana y parte del Guadalquivir, y se están iniciando estudios en el Guadalhorce, Adra y Andárax, Palancia, Serpis, Llobregat, Tordes y Ter, por parte del Servicio Geológico de Obras Públicas.

6. TIPOLOGIA DEL USO CONJUNTO

En lo que sigue haremos un intento de clasificación tipológica de diversas posibilidades del uso conjunto. Es distinta de otras clasificaciones anteriores aplicables al uso conjunto de diversas fuentes de agua, que destacan las interrelaciones entre ellas y con los centros de consumo, empleando criterios topológicos (Yevjevich, 1979). Se hace hincapié en el papel desempeñando por los acuíferos, destacando las funciones habitualmente reconocidas en un sistema de recursos hidráulicos: fuente de agua, almacenamiento o regulación y tratamiento.

No consideramos el papel de los acuíferos como elemento de transporte de agua, al ser los acuíferos con carácter general poco adecuados para cubrir esta función. Tampoco se incluyen de forma explícita los casos en los que el acuífero actúa como elemento de distribución al estar fuertemente relacionado con su papel como elemento de almacenamiento. Los acuíferos también proporcionan medios alternativos de distribución y ahorros sustanciales en los elementos de distribución superficial (James and Lee, 1971).

6.1. Utilización del acuífero como fuente de suministro de agua

Además de los recursos explotables de un acuífero, se puede utilizar el agua almacenada en los acuíferos denominada «one time reserve», sobreexplotando temporalmente.

La sobreexplotación incontrolada de las aguas subterráneas es uno de los problemas más graves de la gestión de los recursos hidráulicos. En los Estados Unidos, el 25 por 100 del agua bombeada procede de la sobreexplotación de acuí-

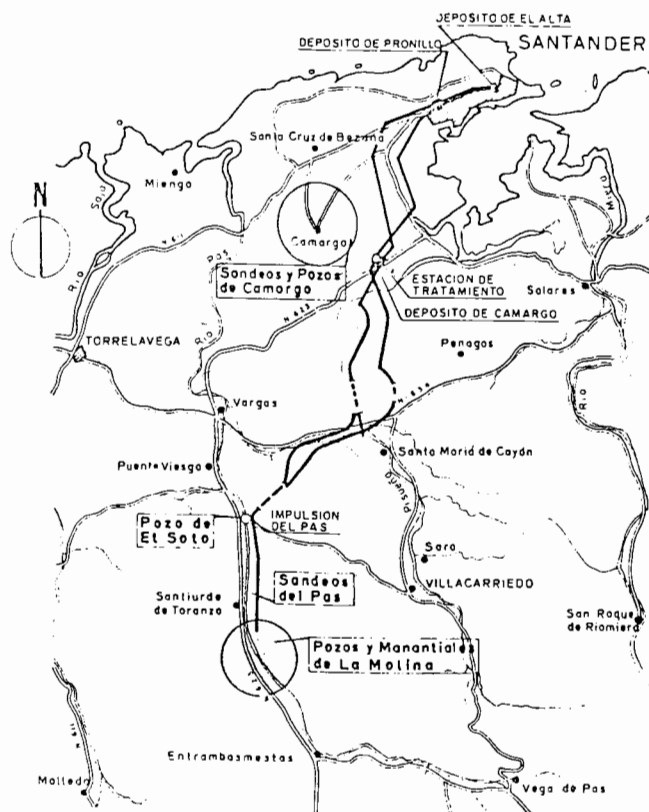


Figura 14.— Abastecimiento de Santander. Propuesta de uso conjunto.

feros y en las zonas áridas de México más del 50 por 100 del agua utilizada procede de la explotación de acuíferos con recarga muy reducida (Comisión de Plan Nacional Hidráulico, 1977). En California la sobreexplotación de aguas subterráneas era de 5 Km³/año en 1955, habiéndose reducido gracias a la utilización conjunta y a la recarga artificial, a una cifra entre 2,5 y 3,1 Km³. en 1982 (S.W.R.C.B. y D.W.R., 1982). También existen problemas de explotación en algunas zonas del Mediterráneo español, en La Mancha y en las islas Canarias.

A pesar de los graves problemas económicos y sociales que puede provocar, no tiene por qué proscribirse la sobreexplotación de las aguas subterráneas, como norma general. Hemos comentado antes que una de las causas de la prosperidad de California se ha atribuido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas, lo que ha hecho posible el desarrollo económico, creando las condiciones que han permitido llevar a cabo otros proyectos más costosos, entre ellos los trasvases desde las cuencas más lluviosas del norte del Estado.

La posibilidad de poder contar con cantidades importantes de agua en los acuíferos ha inducido a proponer, de forma planificada, el uso de las reservas para retrasar la construcción de obras superficiales más costosas. Así se ha hecho en Israel donde se ha propuesto una metodología para su modelación y optimización económica (Schwarz, 1980).

6.2. Los embalses subterráneos como elementos de regulación

Hay diversas formas de aprovechar la enorme cantidad de almacenamiento frecuentemente disponible en los acuíferos. El concepto clásico por el que se asocian los acuíferos a elementos de almacenamiento es el de la recarga artificial. No obstante, es con frecuencia caro, y su utilización a gran escala está limitada por su coste. Son clásicas las realizaciones del sur de California y de Israel, en las que los acuíferos se utilizan como elementos de almacenamiento terminal o lateral de trasvases de agua, además de servir de almacenamiento de aguas superficiales locales o de aguas residuales tratadas.

Otra posibilidad es la de utilizar los embalses superficiales con mayor intensidad en años o períodos húmedos y bombear más de los acuíferos en los secos. El volumen de almacenamiento utilizable sería proporcionado por las oscilaciones piezométricas. En el Valle Central de California —antes aludido—, con el que se conseguiría un almacenamiento subterráneo de 37.000 Hm³. con oscilaciones piezométricas relativamente pequeñas. En España también se han propuesto esquemas análogos en distintas cuencas.

El análisis de los sistemas río-acuífero, pone de manifiesto que incluso en acuíferos aluviales de anchura reducida, al alejar suficientemente los pozos de los ríos se puede conseguir un desfase de la influencia de los bombeos en detraer caudales superficiales. Localizando adecuadamente los pozos y programando los bombeos de acuerdo con la secuencia de aportaciones superficiales, es posible aumentar las disponibilidades de agua. Las oscilaciones piezométricas provocadas son las que proporcionan el almacenamiento subterráneo que contribuye a esta mejora. Con la utilización conjunta, entendida de esta forma, no tiene sentido la objeción de que los bombeos de agua subterránea disminuyen el caudal de los ríos.

Por último, la recarga inducida es otro mecanismo que puede contribuir al almacenamiento subterráneo de aguas superficiales. La explotación intensiva de aguas subterráneas ha modificado, definitiva o temporalmente, el carácter de ganador de muchos ríos, transformándolos en perdedores.

6.3. Tratamiento o mejora de la calidad

En la recarga artificial por superficie, las características físicoquímicas y biológicas del agua se transforman a su paso por la zona no saturada, eliminándose o reduciéndose en gran proporción las bacterias, virus, materia orgánica y muchos compuestos tóxicos. Su aplicación se hace en gran escala en muchos países del centro y norte de Europa, como método de tratamiento de aguas superficiales contaminadas. En Israel se ha utilizado la recarga artificial para mezclar en el acuífero aguas de características químicas distintas. En otros casos se han recar-

gado aguas residuales usadas, aunque por ahora las realizaciones son muy limitadas.

El problema de la calidad del agua y del control de su contaminación está pasando a ser también, como en las aguas superficiales, crucial para el aprovechamiento y gestión de las aguas subterráneas. A ello se están dedicando grandes esfuerzos que habrá que incrementar en el futuro.

6.4. Otras posibilidades de las aguas subterráneas

En época de sequía se puede hacer mayor uso de las aguas subterráneas. En el verano de 1976 se hizo así en varios países europeos. En el estiaje de 1976-77, en California, se consiguió reducir de forma importante sus efectos (S.W.R.C.B. y D.W.R., 1982).

En España se ha podido mitigar en algunas zonas la sequía que se padece desde 1980 gracias a la iniciativa privada y en menor medida, por la actuación de la Administración. De hecho, sus efectos han sido menores en las zonas en las que la utilización de las aguas subterráneas es mayor, y se ha propuesto una metodología para aplicarla con el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas (Sahuquillo, 1983 b).

El riego con aguas superficiales en zonas áridas crea con frecuencia problemas de drenaje y salinización de suelos y agua que pueden paliarse con el bombeo de aguas subterráneas. El caso más espectacular es el de los riegos del Punjab, ya citado.

Se ha evaluado en 25.000 Hm³. anuales el agua descargada anualmente en el Asia Central Soviética por los sistemas de drenaje agrícola de las zonas regadas, y se ha propuesto utilizar conjuntamente las aguas superficiales con las subterráneas para utilizar, en parte, estos recursos (Kats, 1975).

7. METODOS DE ANALISIS DEL USO CONJUNTO

Los métodos de análisis del uso conjunto se pueden dividir por la forma en que se analiza el comportamiento de los acuíferos. Lo más

simple es considerarlos como elementos con parámetros agregados, en los que se globalizan todas las propiedades del acuífero en unos pocos parámetros. Si se considera la distribución espacial de los parámetros del acuífero, se puede complicar la simulación y la mayor parte de los métodos de optimización existentes son inaplicables a los casos reales.

Se han considerado los acuíferos con parámetros agregados en algunos métodos de optimización (Buras, 1963, 1967), (Bear, Levin y Buras, 1964). Los métodos de simulación y optimización de acuíferos con parámetros distribuidos han sido revisados por Gorelick, 1983, que analiza la aplicación de distintas técnicas simulación, programación lineal y no lineal, programación entera y modelos jerárquicos.

La aplicación de técnicas de programación dinámica a acuíferos con parámetros distribuidos, está restringida por el problema de la dimensionalidad; (Andréu, 1982), aplica un algoritmo de simulación y programación dinámica que puede ser del máximo interés en algunos casos; Fernández Bono (1983), aplica el análisis jerárquico para analizar la incorporación de los acuíferos a la explotación de un canal de gran longitud, utilizado conjuntamente con los acuíferos que atraviesa.

7.1. Estrategias de simulación

A pesar del desarrollo de las técnicas de optimización, su aplicación sólo es factible en la actualidad a casos de dimensión reducida. En los casos reales hay que recurrir a la simulación.

Por simulación completa del acuífero se ha definido su tratamiento como unidad autónoma perfectamente diferenciada, especificando espacial —si se considera el acuífero con parámetros distribuidos— y temporalmente, las secuencias de entradas de agua al acuífero y los bombeos, obteniendo las respuestas de su comportamiento en sus variaciones de nivel, volumen de agua almacenado y sus intercambios con las aguas superficiales (Sánchez, 1983 c).

La simulación completa tiene el grave inconveniente de tener que separar de las aportaciones totales del caudal de un río las aportaciones de origen subterráneo, y en el acuífero la

frecuencia temporal —y espacial en su caso— de la recarga, si se quieren utilizar datos históricos. En el caso de utilizar series sintéticas, los inconvenientes serían análogos. Por ello es preferible utilizar la técnica de superposición, siempre que el acuífero pueda considerarse que goza de las propiedades de los sistemas lineales (Sahuquillo y Sánchez, 1983). Los efectos provocados por las acciones exteriores, sobre los niveles del acuífero y transferencias de caudal entre éste y las aguas superficiales, se superpondrían a los históricos. De esta manera se pueden simplificar en gran medida las simulaciones, sobre todo si se extienden a muchos años.

Los sistemas lineales han sido, sin duda, los que han merecido más atención, tanto en las técnicas de simulación como de optimización.

Se ha utilizado el concepto s.d.f., Jenquis, (1970), función de influencia, función tecnológica o kernel, Schwarz (1973 y 1976) Maddock (1972), Morel-Seytoux et al (1973).

El método de los autovalores (Sahuquillo, 1983) se aplica a acuíferos lineales y da la solución de forma explícita y continua en el tiempo. Su aspecto más interesante es que transforma, tanto las acciones exteriores como las condiciones iniciales, de forma explícita, en un vector de estado a partir del cual se obtienen directamente los niveles del acuífero y los flujos, tanto en su interior como de intercambio con las aguas superficiales. Esta particularidad tiene la ventaja sobre los métodos de funciones de influencia en que no hay que almacenar éstas ni las acciones exteriores, con gran ahorro de memoria y tiempo de ordenador. Andréu (1982) ha extendido y hecho práctico el método para casos reales a través de los conceptos de acciones elementales y parámetros de control.

Los modelos pluricelulares englobados son un caso particular del método de los autovalores, en el que se asimila un acuífero a otro rectangular de transmisibilidad y almacenamiento homogéneos.

El modelo USOCON (Andréu y Marco, 1983), utiliza a la vez la simulación por superposición y los modelos pluricelulares englobados, lo que permite realizar simulaciones de sistemas de uso conjunto relativamente complicados, de una for-

ma sencilla y eficiente, sin introducir las simplificaciones excesivamente drásticas, necesarias con otros modelos.

CONCLUSION

Aunque con mucha frecuencia se han ignorado por los planificadores, las aguas subterráneas pueden proporcionar ventajas técnicas y económicas dignas de tenerse en cuenta. Pueden proporcionar recursos adicionales de agua y posibilidades de almacenamiento, distribución y tratamiento del agua, pudiéndose combinar ventajosamente con los elementos superficiales. Igualmente pueden proporcionar otras ventajas, tales como su adaptabilidad a un crecimiento progresivo de la demanda, la posibilidad de sobreexplotación temporal para retrasar la construcción de obras costosas, mitigar sequías y paliar problemas de drenaje.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREU, J. (1982): «Simulation-optimization algorithm for stream aquifer systems analysis». M. Sc. Thesis. Colorado State University.
- ANDREU, J. (1984): «Aplicación del método de los autovalores al análisis de sistemas con uso conjunto de recursos superficiales y subterráneos». Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- ANDREU, J., MARCO, J. (1983): «El modelo USOCON de simulación de la utilización conjunta de una cuenca». En: utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- ANDREU, J. y SAHUQUILLO, A. (1984): «Aplicación del método de los autovalores a la simulación del uso conjunto». En preparación.
- ARAGONES, J. M., SAHUQUILLO, A. (1975): «Los embalses permeables como elemento de recarga de los acuíferos. Algunos ejemplos de la cuenca del Júcar (España)». II Congreso Iberoamericano de Geología Económica. Buenos Aires.
- BEAR, J., LEVIN, O., BURAS, N. (1964): «Optimal utilization of aquifers as elements of water-resource systems». Technion (Israel Institute of Technology) T.R.D.F. Hydraulic Laboratory, Haifa, Israel.
- BREDEJPEFT, J. D., YOUNG, R. A. (1983): «Conjunctive use of groundwater and surface water for irrigated agriculture: risk aversion». (en prensa).
- BURAS, N. (1963): «Conjunctive operation of dams and aquifers». Journal of Hydraulic Division, ASCE, Vol. 89, HY6, November, pp. 111-131.

- BURAS, N. (1967): «Operaration of a complex water resources utilization system». Conference on water for peace. Washington D.C., May 1967.
- CHATURVEDY, M. C., SRIVOSTAVA, V. K. (1979): «Induced groundwater recharge in the Ganges basin». Water Resources Research Vol. 15, No. 5, October.
- CAHUDRY, M. T. et al. (1974): «Optimal conjunctive use model for Indus basin». Journal of the Hydraulic Division, ASCE, Vol. 100, No. HY 5, May, pp. 667-687.
- COE, J. J. (1979): «Groundwater storage for California water project». Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 105, No. IR 3, pp. 305-315.
- CALIFORNIA State Department of Water Resources. (1957): «The California Water Plan». Bull. n.º 3.
- CALIFORNIA State Department of Water Resources. (1966): Planned utilization of groundwater basins: Coastal Plain of Los Angeles County. Appendix C. Operation and Economics». Bull. n.º 4.
- CALIFORNIA State Department of Water Resources. (1970): «Water for California. The California Water Plan outlook in 1970». Bull. 160-70.
- CALIFORNIA State Department of Water Resources. (1971): «Meeting Water demands in the Chino-Riverside Area». Bull. 104-3.
- CUSTODIO, E., CACHO, F., SUAREZ, M., ISAMAT, F. J., MIRALLES, J.M. (1977): «Combined use of surface and groundwater in Barcelona Metropolitan Area (Spain)». Inter. Assoc. Hydrogeologist. Birmingham, Vol. XIII, pp. C.14-27.
- DOWNING, R. A. (1975): «Water resources planning and development in the United Kingdom». 3º. Convegno Internazionale sulle Acque sotterranee, 2º Conferenza Internatiozonale sulla pianificazione delle acque, Palermo, Italia, 11 pp.
- DOWNING, R. A. et al. (1974): «Regional development of groundwater resources in combination with surface water». Journal of Hydrology, Vol. 22, No. 1-2, June, pp. 155-177.
- DOWNING, R. A. et al. (1979): «Emploi des eaux souterraines pour l'alimentation du débit des rivières». Bulletin du B.R.G.M., Section III, No. 3, pp. 349-346.
- ERHARD-CASSEGRAIN, A. et MARGAT, J. (1983): «Introduction á l'economie général de l'eau». Masson.
- FERRER, J. y RAMOS, F. (1983): «La plana de Castellón. Modelo de calidad». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- FIERING, M. B. (1971): «Simulation models for conjunctive use of surface and groundwater». Seminar con Groundwater, Granada, Spain, F.A.O.-Gobierno Español, pp. 1-25.
- FOWLER, L. (1981): «Case study U.S.A. Santa Clara Valley District». NATO Advanced Study Institute. Operation of Complex Water Resource Systems. Erice (Trapani), Italia, May.
- GOMEZ DE PABLOS, M. (1974): «Economía del agua». I Conferencia Nacional sobre Hidrología General y Aplicada, I Salón Bienal Monográfico del Agua, Zaragoza, pp. 45-55.
- GORELICK, S. M. (1983): «A Review of Distributed Parameter Groundwater Management Modeling Methods». Water Resources Research. Vol. 19, No. 2, April 1982, pp. 305-319.
- GREEN, M. G. (1965): «Artificial recharge to the Edward's limestone aquifer in South Texas». Simposio de Dubrovnik. Pub. 174 I.A.S.H. pp. 465-481.
- JAMES, L. D. and LEE, R. R. (1971): «Economics on Water Resources Planning» McGraw-Hill Book Company.
- JAMES, D. L. and ROGERS, J. R. (1979): «Economics and Water Resources Planning in America». Journal of the Water Resources Planning and Management Division. A.S.C.E., Vol. 105, No. WR1, March 1979, pp. 47-64.
- JAQUETTE, D. J. (1981): «Efficient water use in California: Conjunctive management of ground and surface reservoirs In: L.R. Beard (Guest editor), Water for survival J. Hydrol., 51 187-204.
- JERKINS, C. T. (1970): «Computation of rate and volume of stream depletion by wells». Techniques of Water Resources Investigations, U.S. Geological Survey, Book 4, Chapter D 1, 22 pp.
- KATS, D. M. (1975): «Combined use of ground and surface waters for irrigation. Soviet Hydrology». Selected papers. Publish ed by American Geophysical Union. International Water Resources Ass. American Water Resources Ass. pp. 190-194.
- LOPEZ-CAMACHO, B. y VARELA, M. (1983): «El modelo de utilización conjunta de la Provincia de Madrid». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- MADDOCK, T. (1972): «Algebraic technological functions from a simulation model». Water Resources Research. Vol. 8, No. 2, pp. 129-134.
- MARTIN, A., MOUSSU, H. (1967): «Recharge artificielle de la nappe de Sebitokane». A.I.H., Vol. VIII, Reunión de Estambul.
- MARCO, J. (1983): «La Plana de Castellón. Modelo superficial». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- MERCADO, A. (1980): «The coastal aquifer in Israel: Some quality aspects of groundwater management». In Water Quality Management under conditions of scarcity. H.I. Shuval Edit. Academic Press.
- MOREL-SEYTOUX, H. J., YOUNG, R. A., RADOSZEWICH, G. E. (1973): «Systematic design of legal regulation for optimal surface groundwater usage-PHASE 1». Colorado State University Environmental Resources Center, Report No. 53, August, 81 p.
- SAHUQUILLO, A. (1983): «Panorámica mundial. Tipos

- gia del uso conjunto». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Universidad Politécnica de Valencia- Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- SAHUQUILLO, A. (1983 b): «An eigenvalue numerical technique for solving unsteady groundwater models continuously in time». Water Resources Research. Vol. 12, pp. 87-93.
- SAHUQUILLO, A. (1983 c): «La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas como paliativo de la sequía». Proceedings III Simposio Nacional de Hidrogeología. Madrid, Spain, May 1983. pp. 253-270.
- SAHUQUILLO, A., SANCHEZ, A. (1983): «Metodología para la realización de estudios de utilización conjunta de aguas superficiales -aguas subterráneas». Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid. Boletín de Información y Estudios num. 43.
- SANCHEZ, A. (1983 a): «Definiciones e identificación del sistema de recursos hidráulicos». En: Utilización de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- SANCHEZ, A. (1983 b): «La Plana de Castellón. Presentación». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- SANCHEZ, A. (1983 c): «Modelo de optimización». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- State Water Resources Control Board and the Department of Water Resources. State of California. Joint Report. (1982): «Policies and Goals for California Water Management. The next 20 years». January 1982.
- SCHULKE, D. (1975): «Aspectos legales e institucionales de la sobreexplotación del agua subterránea en los Estados Unidos de Norteamérica». En: Comisión del Plan Nacional Hidráulico. Mexico, D. F. Bull. 15.
- SCHWARZ, J. (1973): «Linear models for groundwater management». Tahal T 73/4, March.
- SCHWARZ, J. (1976): «Linear models for groundwater management». Journal of Hydrology, Vol. 28, No. 2-4, pp. 377-392.
- SCHWARZ, J. (1980): «A systems Approach to the Strategy of Integrated Management of Surface and Groundwater Resources». In: Water Quality Management under conditions of Scarcity. Israel as a case study. H.I. Shuval Editor. Academic Press.
- TAYLOR, O. J., LUCKEY, R. R. (1974): «Water management studies of a stream aquifer system, Arkansas River Valley, Colorado». Groundwater, Vol. 12, No. 1, January, pp. 22-38.
- VARDI, Y. (1980): «National Water Resources Planning and Development in Israel. The endangered resource». In: Water Quality Management under conditions of scarcity. H.I. Shuval Edit. Academic Press.
- VARELA, M. (1983): «La Plana de Castellón. Modelo subterráneo». En: Utilización Conjunta de Aguas Superficiales y Subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas y Universidad Politécnica de Valencia.
- WIENER, A. (1972): «The role of water in development». McGraw Hill Book Company. 1982.
- WILLEKE, G. E. (1979): «Social aspects of water resources planning». Journal of the Water Resources Planning and Management Division. ASCE. Vol. 5, No. WRJ, March, 1979, pp. 79-90.
- YEVJEVICH, V. (1979): «Conjunctive water use». Water International. Vol. 4, No. 3, September 1979, pp. 17-24.
- YOUNG, R. A. BREDEHOEFT, J. D. (1972): «Digital computer simulation for solving management problems of conjunctive groundwater and surface water systems». Water Resources Research, Vol. 8, No. 3, June, pp. 533-558.

Andrés Sahuquillo Herráiz



Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la promoción de 1960. Trabajó en las empresas AEPO y CIMENTACIONES ESPECIALES, S. A. En 1963 ingresó en el Ministerio de Obras Públicas, desarrollando la mayor parte de su actividad en el Servicio Geológico de Obras Públicas, donde dirigió la Sección de Estudios Hidrogeológicos durante quince años. Ha participado activamente en simposios y congresos nacionales e internacionales y es autor de numerosas publicaciones en revistas españolas y extranjeras. Ha sido profesor encargado de Curso en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense y en las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros de Caminos de Madrid y Valencia, de la que es en la actualidad catedrático de Geología Aplicada. Ha sido investigador Principal de proyectos de investigación cooperativa con las Universidades de Arizona, Colorado, Stanford y George Washington, y con el United States Geological Survey.